

Caractérisation physico-chimique des eaux de surface et des altérites du bassin versant du lac Bam, Centre Nord du Burkina Faso

**Césard MILLOGO^{1,2*}, Corneille BAKOUAN^{1,3}, Sâga SAWADOGO²
et Samuel NAKOLENDOUSSE²**

¹ *Université de Ouahigouya, Unité de Formation et de Recherche en Sciences et Technologies,
01 BP 346 Ouahigouya 01, Burkina Faso*

² *Université Joseph KI-ZERBO, Unité de Formation et de Recherche en Sciences de la Vie et de la Terre,
Laboratoire de Géosciences et Environnement, 03 BP 7021 Ouagadougou 03, Burkina Faso*

³ *Université Joseph KI-ZERBO, Unité de Formation et de Recherche en Sciences Exactes et Appliquées,
Laboratoire de Chimie Moléculaire et des Matériaux, 03 BP 7021 Ouagadougou 03, Burkina Faso*

* Correspondance, courriel : cesardmillogo@yahoo.com

Résumé

La présente étude consiste à la caractérisation physico-chimique des eaux de surface et des altérites du bassin versant du lac Bam. Elle montre qu'en dehors de l'échantillon du puits PU5 qui est bicarbonaté sodique et potassique, l'ensemble des eaux étudiées présente deux principaux faciès : bicarbonaté calcique et bicarbonaté calcique et magnésien. L'analyse en composante principale (ACP) a fait ressortir les corrélations entre les différents paramètres physico-chimiques et a permis de comprendre les phénomènes pouvant être à l'origine de la minéralisation de ces eaux. Ces phénomènes sont principalement l'infiltration des eaux du pluviollessivage, l'oxydo-réduction et l'hydrolyse acide des minéraux des roches encaissantes. Les eaux du bassin versant sont de bonne qualité même si l'on note une certaine pollution d'origine anthropique à l'Est du côté de Rollo. La présence de l'arsenic à forte teneur dans les eaux du puits PU53 dans la partie australe du bassin est imputable à l'arsénopyrite (FeAsS) qu'on retrouve dans les roches vertes suite aux phénomènes hydrothermaux. Les eaux de surface sont moins minéralisées, plus douces et plus froides que les eaux souterraines. L'interaction entre ces deux types d'eaux se fait essentiellement des eaux de surface vers les eaux souterraines et ce jusqu'au tarissement des cours d'eau en saison sèche.

Mots-clés : *eau de surface, puits, pollution, hydrochimie, ACP.*

Abstract

Physicochemical characterization of surface and weathered rock water in the Bam lake watershed, North Center of Burkina Faso

The present study consists of physicochemical characterization of surface and weathered rock water in the catchment area of Lake Bam. It shows that apart from the sample from the PU5 well, which is sodium and potassium bicarbonate, all of the water studied has two main facies : calcium bicarbonate and calcium and magnesian bicarbonate. Principal component analysis (PCA) highlighted the correlations between the different physicochemical parameters and made it possible to understand the phenomena that may be at the origin of

the mineralization of these waters. These phenomena are mainly the infiltration of rainwater, oxidation-reduction and acid hydrolysis of minerals in the host rocks. The waters of the watershed are good quality although there is some anthropogenic pollution to the east on the Rollo side. The presence of high-content arsenic in the water from PU53 well in the southern part of the basin is attributable to arsenopyrite (FeAsS) found in greenstones as a result of hydrothermal events. Surface water is less mineralized, softer and cooler than groundwater. The interaction between these two types of water takes place mainly from surface water to groundwater, until the rivers dry up in the dry season.

Keywords : *surface water, well, pollution, hydrochemistry, PCA.*

1. Introduction

La qualité des eaux souterraines et de surface, influencée par divers facteurs naturels et anthropiques, est l'une des questions les plus sensibles au monde. Elle est généralement régie par la nature des réactions géochimiques, la solubilité des sels, la lithologie, la vitesse et la quantité d'écoulement des eaux de surface et souterraines, et les activités anthropiques [1, 2]. L'interaction entre l'eau, le dioxyde de carbone atmosphérique et les roches des continents entraîne la dissolution des minéraux qui sont transportés par les eaux de surface [3]. La qualité de ces eaux est un facteur critique qui influence la santé humaine et la production agropastorale [4]. L'étude des mécanismes de minéralisation et de pollution est donc cruciale pour une gestion durable des ressources en eaux [5]. Les interactions entre les eaux souterraines et les eaux de surface sont assez courantes dans les bassins versants [6, 7]. Il est donc nécessaire de comprendre la relation entre les eaux souterraines et les eaux de surface ainsi que des mécanismes de minéralisation pour une meilleure utilisation et une gestion durable des précieuses ressources en eau surtout dans les zones arides et semi-arides [8]. La teneur des principaux ions dans l'eau est largement utilisée pour identifier les processus qui contrôlent sa minéralisation [9 - 14]. Ainsi, l'utilisation d'outils statistiques comme l'analyse des composantes principales (ACP) et la classification hiérarchique ascendante (CHA) dans le traitement des données sur les ions y contribuent. L'ACP est un outil statistique puissant reconnu pour expliquer les corrélations entre variables dans une multitude de données [15, 16]. Le bassin versant du lac Bam situé au Centre Nord du Burkina Faso est une région agropastorale importante du pays. Ce bassin repose sur des granitoïdes et des volcano-sédiments ayant une influence sur la minéralisation de ses eaux. En plus de ces processus de minéralisations naturelles, les intenses activités anthropiques (agricoles, l'orpaillage etc.) peuvent affecter la qualité des eaux [17]. De nombreuses études ont été faites sur le bassin versant du lac Bam mais très peu ont trait à la caractérisation physico-chimique des eaux et à l'interaction entre les eaux de surface et souterraines. La présente étude s'intéresse à la caractérisation physico-chimique, la détermination des phénomènes de minéralisation et des interactions entre les eaux de surface et les nappes d'altérites du bassin. Pour y parvenir, nous ferons une étude hydrochimique et statistique (ACP et CHA) des résultats d'analyses physico-chimiques de ces eaux superficielles du bassin.

2. Méthodologie

2-1. Cadre géographique de l'étude

Le bassin versant du lac Bam se situe dans le Centre Nord du Burkina Faso à environ une centaine de kilomètres au Nord de la capitale politique Ouagadougou. Le bassin est repéré par les coordonnées géographiques (13°15' et 13°60' Latitudes Nord, 1°50' et 1°15' Longitudes Ouest). Du point de vue administratif, la zone couvre partiellement les départements de Kongoussi, Rollo et Bourzanga. Le lac Bam est l'une des plus grandes réserves naturelles d'eau du Burkina Faso drainant un bassin versant de 2623 km² de surface

sur 256,6 km de périmètre [18]. Il mesure une vingtaine de kilomètres de long en moyenne et moins d'un kilomètre de largeur (**Figure 1**). Cette forme particulière du lac est due au fait qu'il épouse le lit d'un affluent très épisodique du Nakanbé [19]. Le bassin versant du lac Bam se caractérise par un relief amorti et mollement ondulé d'où émergent des plateaux cuirassés en buttes témoins et des collines à affleurements gravillonnaires ou rarement rocheux [19]. Les altitudes vont d'environ 290 à près de 500 mètres. Le climat, de type soudano-sahélien, est caractérisé par deux saisons :

- une saison de pluie allant de mi-Mai à mi-October;
- une saison sèche de mi-October à mi-Mai.

La saison des pluies atteint son maximum en Juillet-Août. La station pluviométrique de Bourzanga située au cœur du bassin donne des moyennes pluviométriques annuelles variant entre 500 et 700 millimètres. La végétation est clairsemée et se compose essentiellement de plantes ligneuses et d'herbacés qui se concentrent de façon préférentielle dans les vallées et les plaines inondables.

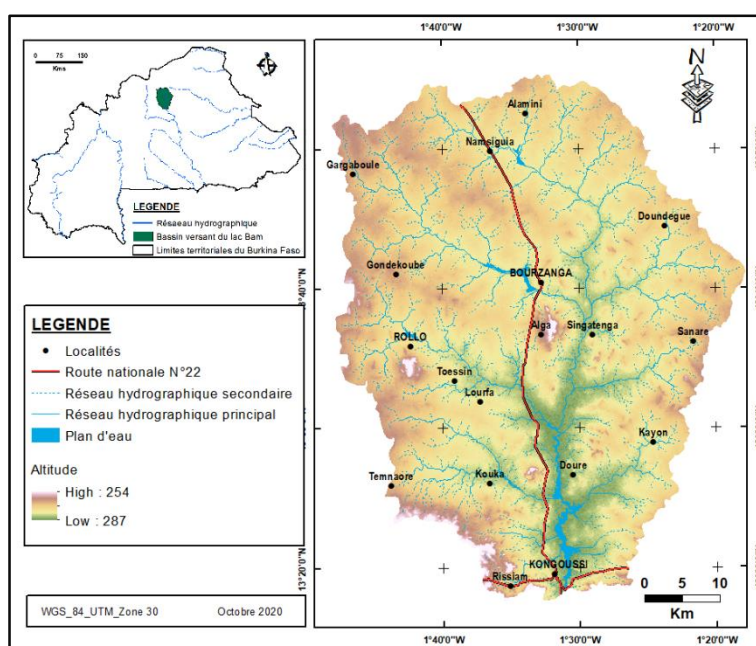


Figure 1 : Présentation de la zone d'étude

Trois grands ensembles géologiques caractérisent le bassin versant du lac Bam (**Figure 2**) [17] :

- Les métasédiments déformés durant l'orogénèse Eburnéenne : ils sont constitués de schistes pélitiques et sériciteux qui affleurent majoritairement dans le Sud et le Centre du bassin versant. Ces formations ont des orientations variant de E-W à NW-SE. L'altération supergène y est très avancée par endroits.
- Les métavolcanites constituées principalement des basaltes affleurent dans le Centre, le Sud et à l'Ouest du bassin. Certains affleurements basaltiques présentent souvent des directions N-S concordant avec la direction de la schistosité locale. L'épaisseur d'altération météorique de ces volcano-sédiments est plus importante contrairement à celle des terrains granitiques [20]. Des lentilles très localisées de quartzites et des grès arkosiques peuvent être observées dans le sud de la zone.
- L'ensemble plutonique : il présente de rares affleurements dans les parties septentrionales et centrales du bassin. Cet ensemble est constitué de gabbro, de diorite, de granitoïde (granite, granite hétérogène et rubané, granite porphyroïde à biotite, leucogranite, granodiorite etc.). Les granitoïdes sont de texture grenue porphyroïde à grenue grossière avec une tendance micropegmatite.

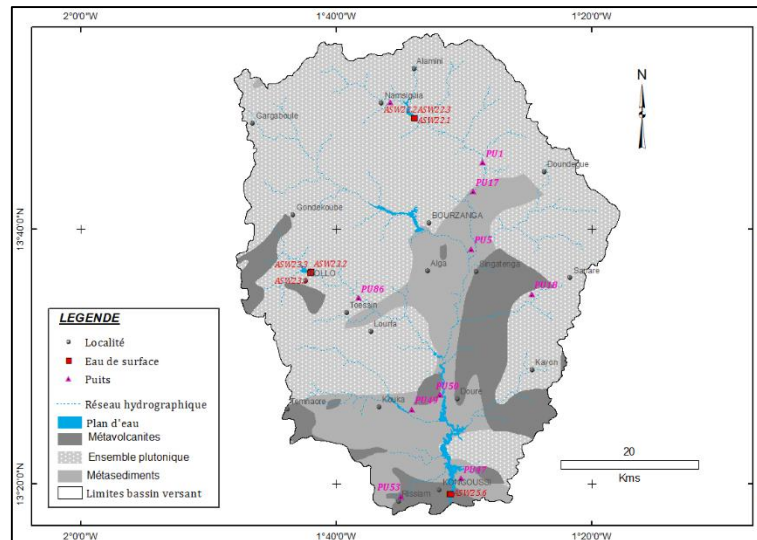


Figure 2 : Carte des grands ensembles géologiques et de répartition des points de prélèvement d'eau selon leur nature

2-2. Méthodes et outils

Les paramètres physico-chimiques sont utilisés comme traceurs naturels, destinés à relever l'organisation et le fonctionnement du système hydrogéologique étudié [21]. La présente étude s'appuie sur les données de paramètres physico-chimiques de 22 lieux de prélèvement d'eau réparties en 12 points d'eau de surface et 10 de puits (**Figure 2**). Ces données d'analyse physico-chimiques proviennent en partie de la Direction Générale des Ressources en Eau (DGRE) du Burkina Faso. Elles ont été mesurées entre 2012 et 2013 lors des campagnes de prélèvement initiées par le projet "Etat des lieux de la qualité chimique des eaux du bassin versant du Nakanbé ". Les paramètres physico-chimiques mesurés sont principalement la température, le pH, la conductivité, la dureté, le titre alcalimétrique complet, la turbidité, les matières en suspension (MES), les matières totales dissoutes (MTD), les cations majeurs (Na^+ , K^+ , Fe^{2+} , NH_4^+), les anions majeurs (HCO_3^{2-} , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , NO_2^- , CN^-) et les métaux et/ou métalloïdes (As, Al). La fiabilité de ces données a été déterminée à partir du calcul de la balance ionique (BI) qui représente l'équilibre entre les cations et les anions exprimées en méq/L présents dans l'eau selon **l'Équation (1)**.

$$[\text{Cl}^-] + [\text{SO}_4^{2-}] + [\text{NO}_3^-] + [\text{HCO}_3^-] = [\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}] + [\text{Na}^+] + [\text{K}^+] \quad (1)$$

L'erreur en % est donnée par **l'Équation (2)**.

$$BI = \frac{\sum \text{cation} - \sum \text{anions}}{\sum \text{cation} + \sum \text{anions}} \times 100 \quad (2)$$

Une analyse chimique des eaux n'est considérée comme représentative et acceptable que lorsque la balance ionique est inférieure ou égale à 10 %. Cette valeur de BI a été utilisée au Burkina Faso avec succès par certains auteurs [22, 23]. Nous n'avons retenu que les données restantes de bonne qualité dont le coefficient de détermination entre les cations et les anions est donné par $R^2 = 0,9679$ (**Figure 3**).

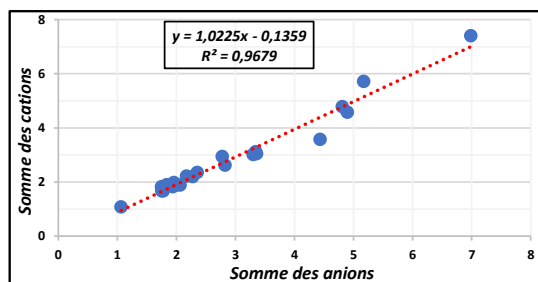


Figure 3 : Graphique montrant la détermination entre anions et cations

La méthode d'étude hydrochimique a nécessité l'utilisation du diagramme de Piper et de Schoeller Berkaloff. Cela a permis de savoir si ces eaux ont subi la même influence ou le même processus de minéralisation. Les traitements statistiques adoptés dans cette étude sont basés sur une combinaison de l'analyse en composante principale (ACP) et la classification hiérarchique ascendante (CHA). L'ACP est une méthode statistique multivariée qui consiste à transformer des variables liées entre elles en de nouvelles variables décorrélatées les unes des autres. L'ACP est réalisée d'une part sur les eaux de surface et d'autre part sur les eaux des altérites. La CHA est dite ascendante car elle part d'une situation où tous les individus sont seuls dans une classe, puis sont rassemblés en classes de plus en plus grandes. Le qualificatif « hiérarchique » vient du fait qu'elle produit une hiérarchisation de l'ensemble des classes. L'utilisation de ces techniques statistiques univariées et multivariées dans le traitement des données de paramètres physico-chimiques des eaux a donné des résultats très probants au Burkina Faso et en Afrique de l'ouest [22, 24 - 27]. Les différents traitements décrits ci-dessus ont été rendus possibles grâce aux logiciels Diagramme et Xlstat.

3. Résultats et discussion

3-1. Analyse comparative des paramètres physico-chimiques

L'analyse comparative des paramètres physico-chimiques représentés dans le **Tableau 1** indique des variations selon la nature des eaux. La répartition de ces paramètres montre que la température est plus élevée dans les eaux souterraines que celles de surface. Elle a une moyenne de 25,5°C dans les retenues d'eau de surface contre 30,28 °C dans les eaux de puits. Cela pourrait être lié d'une part à la température ambiante du milieu au moment du prélèvement ou d'autre part au gradient géothermique qui augmente avec la profondeur. Ces moyennes sont proches de celles observées par certains auteurs au Burkina Faso et au Togo [14, 22, 28 - 30]. Le pH moyen est de 8,17 dans les eaux de surface et de 6,66 dans les eaux de puits. Ce pH à tendance basique dans les eaux de surface se rapproche de la neutralité dans les eaux des altérites. Ce qui signifie que les eaux de puits sont peu acides donc moins agressives et ce malgré la minéralisation en profondeur. En effet, l'oxydation de la matière organique produit du CO₂ sous l'influence de la pression atmosphérique qui acidifie les eaux de surface. En milieu fermé souterrain, l'hydrolyse des silicates absorbe le CO₂ et fait baisser l'acidité de l'eau [31]. La conductivité électrique montre que les eaux de surface sont les plus douces avec une moyenne d'environ 71,35 µS/cm contre 292,46 µS/cm pour celles des puits. La turbidité moyenne, très forte dans les eaux de surface (30,71 NTS) baisse relativement dans les eaux de puits (23,56 NTS). Les matières totales dissoutes (MTD) sont très faibles dans les eaux de surface (71,33 mg/L) et augmentent avec la profondeur. Elles sont d'une moyenne de 292,5 mg/L dans les eaux de puits. La dureté totale (TH) est faible dans les eaux de surface (8,68 °f) et augmente considérablement dans les eaux de puits (14,74 °f). Les eaux de surface sont moins riches en éléments majeurs que les eaux d'altérites (**Tableau 1**). L'ion bicarbonate (HCO₃) est l'anion dominant et le chlorure (Cl) le moins représenté. Ainsi, l'ordre

d'abondance globale est $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^-$ dans les eaux de surface et $\text{HCO}_3^- > \text{NO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$ dans les eaux de puits. L'ion nitrite (NO_2^-) est aussi présent mais à des concentrations faibles et variables. Il est plus significatif dans les eaux souterraines. Aucune eau n'a une concentration en nitrate supérieure à la norme de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) qui est de 50 mg/L. On trouve de l'ammoniac (NH_4^+) dans toutes les eaux de surface et à des concentrations variables (0,08 mg/L à 0,62 mg/L). Cette teneur baisse jusqu'à parfois s'annuler dans les eaux de puits. Seul le puits PU5 situé dans les alluvions de berge de l'affluent du Nakanbé a une teneur en NH_4^+ (2 mg/L) supérieure à la norme de l'OMS (1,5 mg/L) certainement liée à la pollution anthropique. Les éléments chimiques comme le fluor (F), le cyanure (CN^-), l'arsenic (As), l'aluminium (Al) et le zinc (Zn) ont fait l'objet d'analyse. L'analyse des ions phosphore (PO_4^{3-}) n'a pas révélé de variations significatives de teneur dans les différentes eaux. Toutes les eaux ont des teneurs en fluor inférieures à 1,5 mg/L qui est la norme de potabilité de l'OMS. Les eaux de surface sont très riches en fer qui leur confère une bonne partie de leur turbidité. L'aluminium est présent à des concentrations variables dans toutes les eaux et majoritairement à des teneurs inférieures à la norme de l'OMS qui est de 0,2 mg/L. L'arsenic se retrouve dans tous les types d'eaux. Sa teneur est plus faible dans les eaux de surface allant de 3 $\mu\text{g/L}$ à l'absence totale. Tandis que dans certaines eaux de puits, cette concentration atteint des proportions élevées de 37 $\mu\text{g/L}$ qui est supérieure à la norme de l'OMS (10 $\mu\text{g/L}$) (**Tableau 1**).

Tableau 1 : Répartition des valeurs des paramètres physico-chimiques des différentes eaux

Paramètres	Unités	Eaux de surface			Eaux de puits		
		Min	Moy	Max	Min	Moy	Max
T°C	°C	23,70	25,50	27,00	28,60	30,28	31,90
pH		7,60	8,17	9,23	5,50	6,66	7,60
CE	$\mu\text{S/cm}$	57,30	71,35	94,00	92,00	292,46	736,00
Turb	NTS	11,20	30,71	94,86	0,33	23,56	98,44
MTD	mg/L	57,00	71,33	94,00	92,00	292,50	736,00
MES	mg/L	0,00	6,80	35,80	0,00	30,90	256,40
TH	°f	3,60	8,68	14,60	6,90	14,74	24,86
Ca^{2+}	mg/L	7,20	17,63	29,80	6,40	24,22	44,60
Mg^{2+}	mg/L	4,40	9,72	17,40	11,80	21,02	44,30
Na^+	mg/L	1,80	6,38	14,50	0,30	19,47	94,8
K^+	mg/L	2,10	3,46	5,20	1,00	3,26	8,00
Fe^{2+}	mg/L	0,16	0,60	1,66	0,02	0,20	0,74
NH_4^+	mg/L	0,08	0,25	0,62	0,00	0,34	2,00
HCO_3^{2-}	mg/L	60,00	122,17	201,50	105,20	227,12	417,2
Cl^-	mg/L	0,25	0,58	1,65	0,61	1,10	2,23
SO_4^{2-}	mg/L	2,00	2,00	2,00	2,00	2,70	4,00
NO_2^-	mg/L	0,00	0,00	0,01	0,00	0,02	0,16
NO_3^-	mg/L	0,44	1,47	3,08	0,44	3,87	11,00
PO_4^{3-}	mg/L	0,07	0,11	0,21	0,15	0,23	0,32
F ⁻	mg/L	0,03	0,19	0,54	0,02	0,22	0,80
CN^-	mg/L	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
Al	mg/L	0,62	1,48	3,15	0,10	0,69	1,32
As	$\mu\text{g/L}$	0,00	0,58	3,00	0,00	3,90	37,00
Zn	mg/L	0,02	0,00	0,04	0,00	0,02	0,04

3-2. Faciès hydrochimiques

L'étude hydrochimique des eaux superficielles du bassin versant du lac Bam montre que les ions bicarbonate (HCO_3^-) sont dominants. On a une assez bonne corrélation (77,89 %) entre la teneur en HCO_3^- et la conductivité

dans les eaux de puits (**Figure 4A**). Ce qui implique que les bicarbonates contrôlent la conductivité de ces eaux souterraines. Cette tendance n'est pas observée pour les eaux de surface qui se regroupent et dont les conductivités restent faibles sans évoluer avec l'augmentation des teneurs en HCO_3^- . Les nitrates du fait de leurs faibles teneurs n'ont pas d'impact direct sur la minéralisation des eaux (**Figure 4B**).

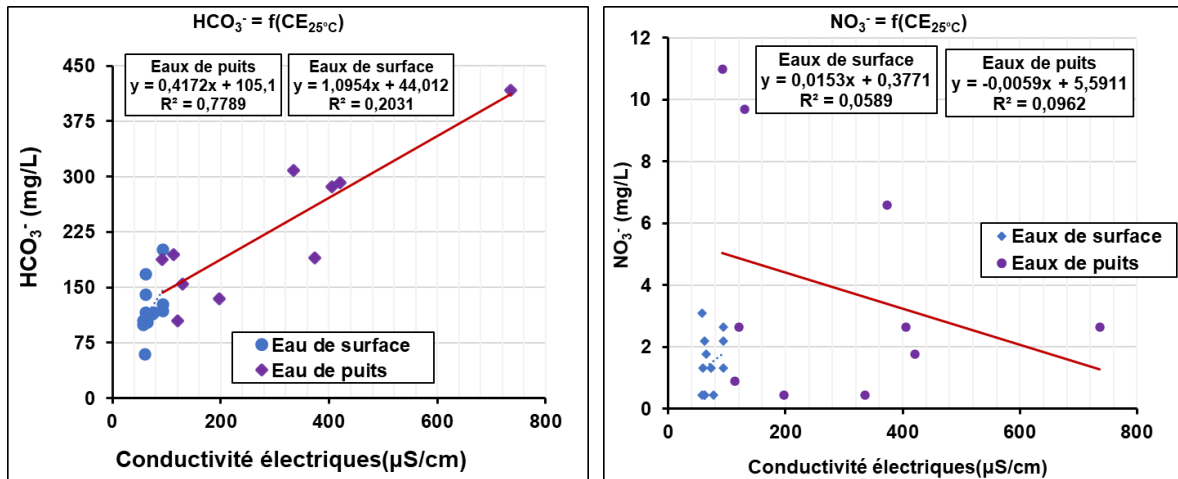


Figure 4 : Corrélation entre paramètres physico-chimiques : (A) conductivité électrique et HCO_3^- ; (B) conductivité électrique et NO_3^-

La forte prédominance des anions bicarbonate HCO_3^- sur les autres anions (NO_3^- , SO_4^{2-} et Cl^-) dans l'ensemble des eaux est bien représentée sur les diagrammes de Piper (**Figure 5**). Dans les eaux de surface, la majeure partie des cations sont en équilibre même si certains évoluent vers le pôle calcique (**Figure 5A**). Dans les puits, les cations commencent à perdre leur équilibre et les eaux évoluent vers les pôles alcalins magnésiens (**Figure 5B**). En dehors de l'échantillon du puits PU5 qui est bicarbonaté sodique potassique, l'ensemble des eaux étudiées présente deux principaux faciès : bicarbonaté calcique et bicarbonaté calcique et magnésien.

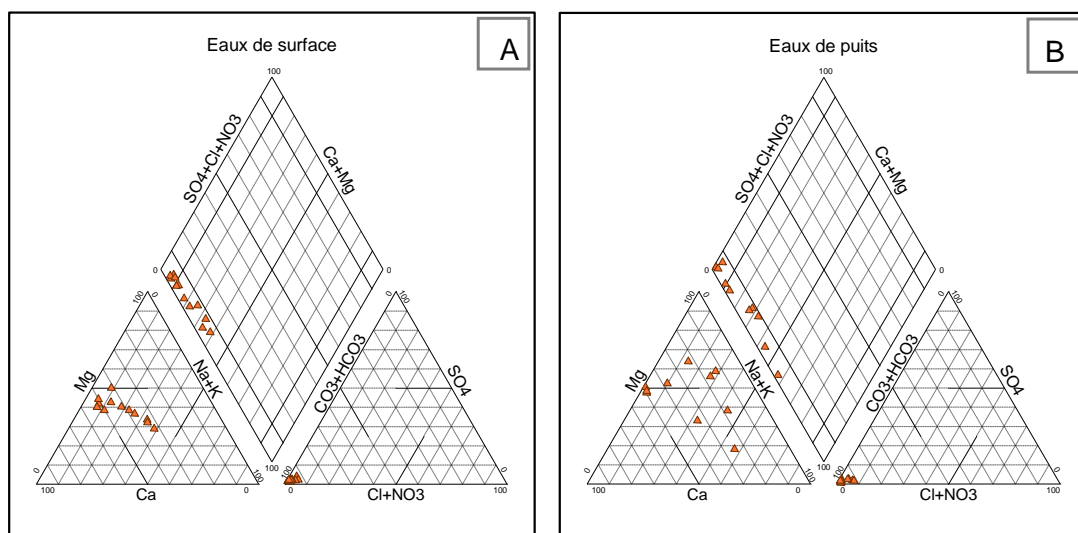


Figure 5 : Faciès hydrochimique des différentes eaux

Pour tenter de mieux comprendre les processus de distribution des ions dans les différentes eaux, les teneurs des différents éléments chimiques ont été représentées sur le diagramme de Berkaloff (**Figure 6**). Ce diagramme confirme une fois de plus la dominance des faciès bicarbonatés calciques et bicarbonatés calciques

et magnésiens sur les eaux avec des pics sur l'échelle de graduation des dits éléments. Quant aux cations majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ et K^+), ils évoluent en fonction du type d'eau. Pour les eaux de surface, on note un certain parallélisme entre les axes des ions (**Figure 6A**). Cela signifie que les eaux de surface subissent la même influence ou le même processus de minéralisation. Par contre pour les eaux de puits, ces axes se recoupent et sont moins parallèles (**Figure 6B**) évoquant différents processus d'acquisition de la minéralisation suite au contact de l'eau avec les terrains encaissants ayant eux-mêmes des compositions chimiques différentes. Pour mieux comprendre les processus d'acquisition qui régissent la minéralisation des différentes eaux du bassin versant du lac Bam, nous avons procédé à un traitement statistique de leurs paramètres physico-chimiques.

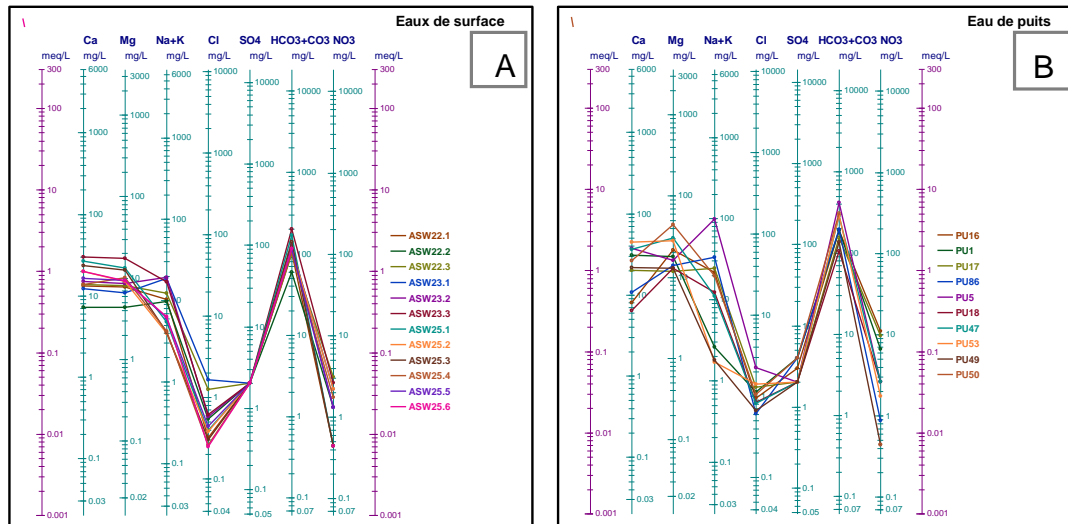


Figure 6 : Répartition des différents paramètres chimiques dans les eaux selon le diagramme de Berkaloff

3-3. Analyse statistique des paramètres physico-chimiques des eaux de surface

L'étude statistique des paramètres a consisté en une analyse en composantes principales. Dans cette analyse, les coefficients de corrélation entre les différentes variables prises deux à deux sont consignés dans une matrice de corrélation. Aussi, une CHA a été faite pour la détermination des différentes classes d'eau. Dans toutes les eaux de surface, la concentration en sulfate (SO_4^{2-}) reste invariable pour tous les échantillons analysés et dans des proportions de 2 mg/L. Des corrélations positives et importantes ont été enregistrées entre les différentes variables telles que : Turb-CE (0,89), MTD-Turb (0,89), Turb-Na (0,89), Turb-K (0,86), Turb-Fe (0,96), Turb- NH_4^- (0,99), Turb-F (0,81), MTD-MES (0,87), MTD-Fe (0,80), MTD- NH_4^- (0,88), MES-Na (0,84) ; MES-Fe (0,84) ; MES- NH_4^- (0,91), MES-F (0,81), TH-Ca (0,94), TH-Mg (0,94) ; TH- HCO_3^- (0,94), Ca-Mg (0,94), Mg- HCO_3^- (0,93) , Na-K (0,94), Na-Fe (0,90), Na- NH_4^- (0,91), K-Fe (0,92), K- NH_4^- (0,87), Fe- NH_4^- (0,96). Certaines eaux ont des turbidités supérieures à la valeur de l'OMS (5 NTD). Ces turbidités sont fortement corrélées au fer de l'ordre de 96 % dans les eaux de surface. Le fer serait donc à la base de la turbidité des eaux de surface. On note une forte corrélation qui existe entre le bicarbonate (HCO_3^-) et les alcalino-terreux (Ca^{2+} et Mg^{2+}) dans les eaux de surface. Mais ces ions ne sont pas corrélés à la conductivité. La conductivité électrique des eaux de surface est liée à l'ensemble des MTD plus particulièrement le Fe^{2+} , le K^+ , et le Na^+ . Les eaux de surface sont donc moins minéralisées en bicarbonate et en alcalino-terreux du fait du bref temps de contact avec les terrains encaissants. Les trois premiers axes factoriels expriment 73,14 % de la variance totale dont 39,79 % pour le premier, 23,69 % pour le second et 9,65 % pour le troisième (**Tableau 2**). Cette variance est suffisante pour fournir des renseignements sur les interactions hydrogéochimiques qui se déroulent dans les eaux de surface de la région. L'ACP qui dans le plan factoriel F1-F2 atteint 63,49 % de la variance

exprimée, est la plus représentative et met en évidence trois grands regroupements des paramètres physico-chimiques étudiés (**Figure 7**). Pour éviter que certains aspects mal exprimés sur le plan factoriel F1-F2 ne soit pas pris en compte nous avons aussi analysé l'axe factoriel F1-F3. Le premier regroupement des ions NH_4^+ , K^+ , Fe^{2+} et Na^+ autour de l'axe F1 dans le plan factoriel F1-F2 met en évidence le degré de minéralisation de l'eau par ces éléments. L'on note une très forte corrélation entre la turbidité et le Fe^{2+} (0,95). Cela fait penser à la turbidité de l'eau liée à la présence du fer par des phénomènes d'oxydoréduction. Le deuxième regroupement des ions SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , NO_3^- , NO_2^- , Zn^{2+} , Al^{3+} montre que ceux-ci sont mis en solution par le même processus. La proximité avec les nitrates d'origine superficielle témoigne d'une pollution anthropique liée aux activités agricoles, domestiques et industrielles. L'axe factoriel F1 est donc un axe de minéralisation de l'eau par pluviollessivage des sols grâce aux mécanismes de dissolution des minéraux et d'oxydoréduction. Le troisième regroupement constitué de Mg^{2+} , Ca^{2+} , TH et HCO_3^- très corrélés par rapport à l'axe F2 souligne un processus de minéralisation différent du pluviollessivage. Ce processus est l'hydrolyse des minéraux silicatés durant le contact eau-roche. L'axe factoriel 2 est donc un axe de minéralisation naturelle des eaux par les mécanismes d'hydrolyse des minéraux silicatés. Les eaux des séries ASW22 et ASW25 ont des comportements très proches mais opposés à celles de la série ASW23 (**Figure 7B**). En effet ces deux premières séries (ASW22 et ASW25) bien que prélevées dans des retenues d'eau excentrées communiquent par l'intermédiaire du cours d'eau principale qui est un affluent du Nakanbé. Autrement dit les éléments chimiques présents dans les eaux de la série AWS22 se retrouvent dans celles de ASW25 à l'exutoire du Bam. Ce qui n'est pas le cas pour les eaux de la série ASW23 de la retenue de Rollo. Le dendrogramme de la classification hiérarchique ascendante des eaux de surface met en évidence trois grandes classes statistiques distinctes (**Figure 7C**). La première classe est celle des eaux riches en NO_3^- , Cl^- , F^- et PO_4^{3-} dont la conductivité électrique est liée aux ions Na^+ , K^+ , Fe^{2+} , NH_4^+ . Ce sont des eaux prélevées dans la retenue de Rollo et polluées par les activités anthropiques. La deuxième classe est celle des eaux riches en aluminium et en zinc. On y distingue la formation des ions nitrites. Ces eaux provenant majoritairement de la retenue d'eau de Namsiguia drainent des sols peu évolués donc riches en minéraux contenant de l'aluminium et du zinc. La troisième classe est celle des eaux riches en Mg^{2+} , Ca^{2+} et HCO_3^- issus de l'hydrolyse des silicates.

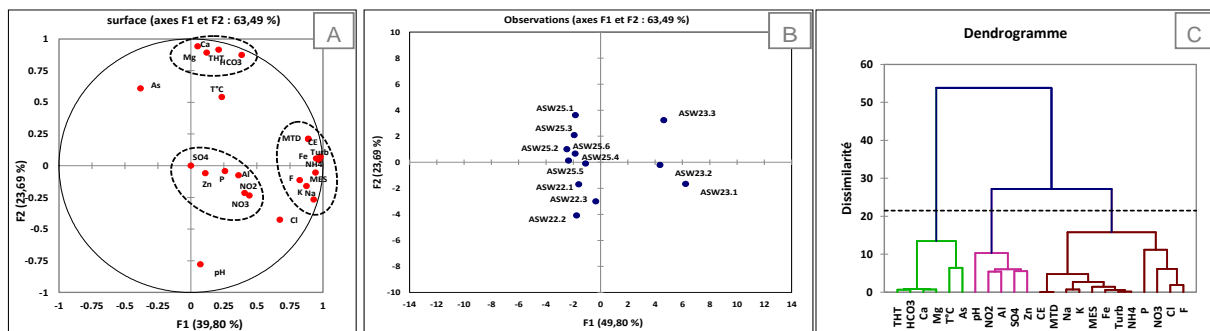


Figure 7 : Analyse des paramètres physico-chimiques des eaux de surface : (A) variables dans le plan F1-F2 ; (B) Unités dans le plan F1-F2 ; (C) Dendrogramme

L'analyse des variables dans le plan factoriel F1-F3 confirme également la tendance exprimée par le plan factoriel F1-F2 (**Figure 8A**). Elle montre très bien la différence de mise en solution par pluviollessivage sur l'axe 1 et par hydrolyse sur l'axe 3. La proximité entre les eaux de la série AW22 et AW25 est bien marquée ainsi que leur opposition à la série AW23 (**Figure 8B**).

Tableau 2 : Tableau des valeurs propres des facteurs des eaux de surface

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11
Valeur propre	9,154	5,450	2,220	1,813	1,495	1,236	0,712	0,448	0,268	0,129	0,077
Variabilité (%)	39,799	23,694	9,652	7,882	6,500	5,375	3,094	1,948	1,164	0,559	0,334
% cumulé	39,799	63,493	73,144	81,026	87,527	92,901	95,996	97,944	99,107	99,666	100,000

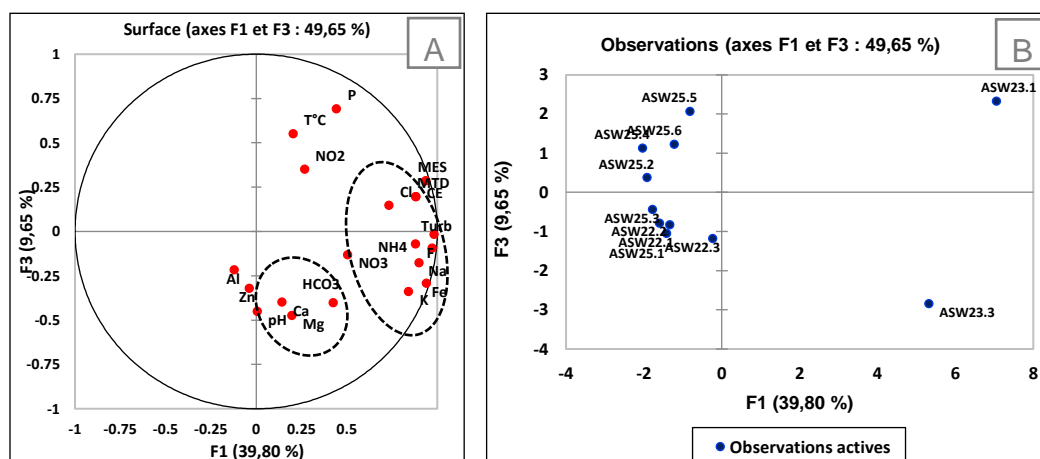


Figure 8 : Analyse des paramètres physico-chimiques des eaux de surface : (A) variables dans le plan F1-F3; (B) Unités dans le plan F1-F3

3-4. Analyse statistique des paramètres physico-chimiques des eaux de puits

Contrairement aux eaux de surface, celles des puits ne contiennent pas de cyanure. La matrice de corrélation montre qu'il existe une bonne corrélation entre CE-MTD (1), CE-Ca (0,83), CE-HCO₃⁻ (0,88), CE-NO₂⁻ (0,81), Turb-Fe (0,90), MTD-Ca (0,83), MTD-HCO₃⁻ (0,88), MTD-NO₂⁻ (0,81), MES-Na (0,93), MES-NH₄⁺ (0,98), MES-Cl⁻ (0,81), MES-NO₂⁻ (0,96), TH-Mg (0,88). La conductivité électrique est totalement contrôlée par les ions dissouts avec un coefficient de corrélation de 1. Les nitrates (NO₃⁻) ont une origine superficielle d'où leur faible et inverse corrélation avec le Ca²⁺ (-0,29). Les eaux souterraines acquièrent donc la plus grande partie de leur minéralisation durant leur séjour dans ces terrains. D'où cette évolution ascendante de la minéralisation avec la profondeur. L'impact prépondérant du HCO₃⁻ sur la conductivité électrique des eaux de puits est bien marqué avec des coefficients de corrélation de près de 88%. Le HCO₃⁻, Ca²⁺ et Mg²⁺ dans les eaux souterraines proviennent de l'hydrolyse acide des minéraux riches en ferromagnésiens à l'exemple du pyroxène [(Ca,Na,Mg,Li)(Mg,Fe,Ti,Al)(Si,Al)₂O₆] et la biotite [K(Mg,Fe)₃(OH,F)₂(Si₃AlO₁₁)] [17]. La faible corrélation du Cl⁻ au Na⁺ écarte l'idée de la présence de minéraux comme le halite ou l'évaporite qui leur auraient fourni ces éléments par dissolution. La présence de l'arsenic à forte teneur dans les eaux du puits PU53 dans la partie australe du bassin peut être imputable à l'arsénopyrite (FeAsS) qu'on retrouve dans les roches vertes suite aux phénomènes hydrothermaux. Les socles rocheux constitués de schistes et de roches volcaniques birimiennes abritant potentiellement des minéraux sulfurés riche en arsenic ont la probabilité la plus élevée de produire des concentrations d'arsenic supérieures à 10 µg/L dans les eaux souterraines [32 - 34]. L'ACP montre que dans les eaux de puits, la turbidité, Fe²⁺, NO₃⁻ et K⁺ sont mis en solution par le phénomène d'oxydoréduction. Le Fe²⁺ est donc à l'origine de la turbidité. La proximité du nitrate montre aussi une minéralisation en fer par infiltration des eaux de surface. Cette infiltration des eaux de surface se fait préférentiellement dans les puits des altérites de recouvrement de volcano-sédiments autour du lac. A travers la présente étude, il est bien établi que les eaux de surface s'infiltrent dans celles des altérites et les formations géologiques impactent la minéralisation des eaux de surface. Cependant l'impact des eaux

d'altérites sur celles de surface n'a pu être établi. Même si cet impact existait, il serait atténué. A l'interface nappe rivière, les effets d'atténuation résultent de plusieurs processus dont les mélanges d'eau (dilution), la biodégradabilité et les processus de sorption [35]. L'interaction se fait essentiellement des eaux de surface vers les eaux souterraines et ce jusqu'au tarissement des cours d'eau en saison sèche. Les niveaux piézométriques des aquifères d'altérites du bassin versant du lac Bam sont très variables et vont de moins de 5m à plus de 20m par endroit et par saison[17]. Ces niveaux sont largement en dessous de la cote d'altitude des lits des cours. Cela peut être conforté par l'absence totale des sources d'eaux naturelles dans le bassin. L'ACP dans le plan factoriel F1-F2 représente 60,38 % de la variance exprimée. Il reste encore 39,62 % de variance à exprimer (**Tableau 3**). Ce qui nous amène à analyser les variables dans le plan factoriel F1-F3. Le plan factoriel F1-F2 est plus représentatif et met en évidence trois grands regroupements des paramètres étudiés comme indiqué par la **Figure 9A**. Le groupe 1 comportant CE, MTD, MES, Cl⁻, Na⁺, NH₄⁺ et NO₂⁻ est indicateur du degré de minéralisation de l'eau par dissolution des minéraux solubles. Le groupe 2 constitué de Ca²⁺, Mg²⁺, HCO₃⁻, pH, TH, Zn²⁺, F⁻, As³⁺, PO₄⁻ et Al³⁺ indique une minéralisation de l'eau par l'hydrolyse acide des silicates et des ferromagnésiens. L'axe F1 traduit donc la minéralisation de l'eau par hydrolyse des minéraux silicatés d'une part et par dissolution des minéraux solubles d'autre part. Le groupe 3, constitué de la turbidité, Fe²⁺, NO₃⁻ et K⁺, s'oppose au groupe 1 et montre que ces éléments sont mis en solution par un mécanisme différent. Ce mécanisme traduit la minéralisation des eaux de puits par le phénomène d'oxydoréduction du Fe²⁺ à l'origine de la turbidité. La proximité du nitrate fait penser à une minéralisation en fer par infiltration des eaux de surface. La nature lithologique des terrains a un impact sur la minéralisation des eaux de puits. Les eaux de puits des terrains granitiques sont concentrées à gauche du graphique des unités dans le plan F1-F2 et s'opposent à celles des puits de terrains basaltiques (**Figure 9B**). Le dendrogramme de la classification hiérarchique ascendante des eaux de puits met en évidence trois regroupements des variables (**Figure 9C**). La première classe est celle des eaux riches en ammoniac et en sel (Na⁺, Cl⁻) à l'exemple de celles du puits PU5 contenant du NH₄⁺ en proportion supérieure à la norme OMS. La deuxième classe est celle des eaux dont la minéralisation est contrôlée par des infiltrations d'eaux de surface. Ces puits sont ceux situés majoritairement dans des altérites de recouvrement de volcano-sédiments autour du lac Bam. La troisième classe est celle des eaux dures riches en majeurs Ca²⁺, Mg²⁺, HCO₃⁻ ayant acquis leur minéralisation suite à un temps de séjour plus ou moins long dans les terrains encaissants. Les cations Ca²⁺ et Mg²⁺ traduisent la dureté (TH) de ces eaux tandis que HCO₃⁻ traduit l'alcalinité. Ces eaux proviennent des puits des altérites situés sur les roches plutoniques dans la partie septentrionale et centrale du bassin.

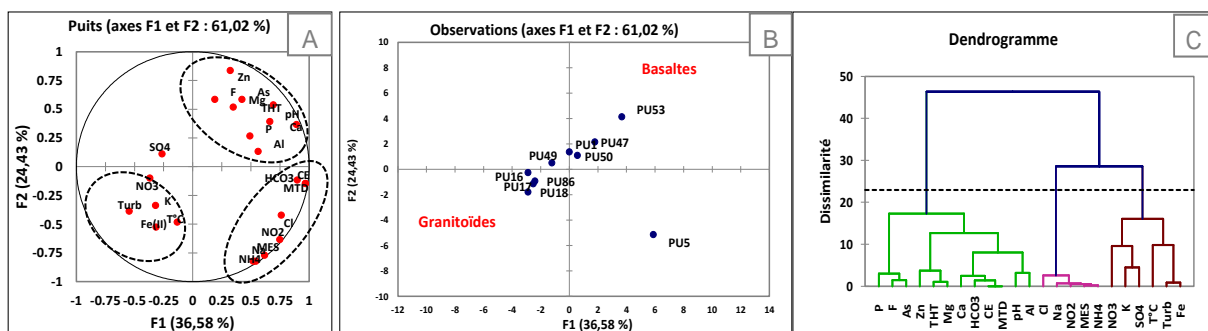
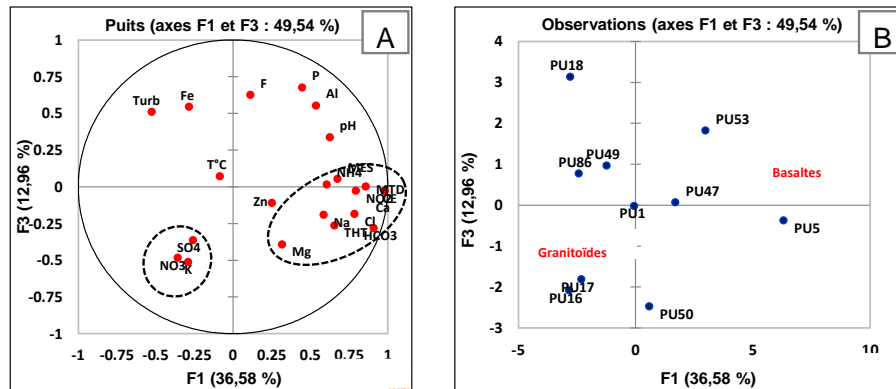


Figure 9 : Analyse des paramètres physico-chimiques des eaux de puits : (A) variables dans le plan F1-F2 ; (B) Unités dans le plan F1-F2 ; (C) Dendrogramme

L'analyse dans le plan factoriel F1-F3 confirme la minéralisation des eaux de puits par hydrolyse des minéraux silicatés et dissolution des minéraux solubles (**Figure 10A**). La distinction entre eaux de puits sur granitoïdes et basaltes est mise en évidence sur l'observation des échantillons d'eau dans le plan F1-F3 (**Figure 10B**).

Tableau 3 : Tableau des valeurs propres des facteurs eaux de puits

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9
Valeur propre	8,194	5,693	3,001	1,952	1,697	0,961	0,785	0,568	0,150
Variabilité (%)	35,626	24,751	13,046	8,488	7,377	4,179	3,412	2,469	0,652
% cumulé	35,626	60,377	73,423	81,911	89,289	93,467	96,879	99,348	100,000

**Figure 10 : Analyse des paramètres physico-chimiques des eaux de puits : (A) variables dans**

4. Conclusion

L'étude physico-chimique des eaux de surface et des altérites du bassin versant du lac Bam à partir des méthodes hydrochimiques et des analyses statistiques conduit à la mise en évidence des caractéristiques de celles-ci et des interactions qui existent entre elles et le milieu encaissant. Les eaux du bassin versant sont de bonne qualité même si l'on note une certaine pollution d'origine anthropique à l'Est du côté de Rollo. Les eaux de surface sont moins minéralisées, plus douces et plus froides que les eaux souterraines. L'ensemble des eaux peuvent être réparties en deux principaux hydrofaciès : les bicarbonatés calciques et les bicarbonatés calciques et magnésiens. Les principaux phénomènes de minéralisation des eaux souterraines du bassin versant du lac Bam sont l'infiltration des eaux du pluviollessivage, l'oxydo-réduction et l'hydrolyse acide des minéraux des roches encaissantes. En perspective, nous envisageons entreprendre des études physico-chimiques et isotopiques selon les saisons (sèche et humide) de l'année afin de mieux comprendre l'hydrodynamisme et l'interaction entre eaux de surface et d'altérites.

Références

- [1] - L. ZONG-JIE, L. ZONG-XING, S. LING-LING, M. JIN-ZHU, and S. YONG, *Science of The Total Environment*, 644 (2018) 1141 - 1151, doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.07.029
- [2] - C. GRIMALDI, "Hydrochimie de petits bassins versants - Apports à la connaissance du fonctionnement géochimique du sol et de la qualité de l'eau des cours d'eau", Habilitation à diriger des recherches, Université de Rennes, 1 (2004) 80 p.
- [3] - G. P. GURUMURTHY, K. BALAKRISHNA, J. RIOTTE, J. J. BRAUN, S. AUDRY, H. N. U. SHANKAR and B. R. MANJUNATHA, *Chemical Geology*, 300 - 301, (2012) 61 - 69, doi : 10.1016/j.chemgeo.2012.01.016
- [4] - Q. ZHENG, T. MA, Y. WANG, Y. YAN, L. LIU et L. LIU, *Procedia Earth and Planetary Science*, 17 (2017) 368 - 371, doi: 10.1016/j.proeps.2016.12.093

- [5] - F. SOUID, B. AGOUBI, F. TELAHIGUE, A. CHAHLAOUI et A. KHARROUBI, *Journal of African Earth Sciences*, 138 (2018) 233 - 246, doi: 10.1016/j.jafrearsci.2017.11.013
- [6] - E. KALBUS, F. REINSTORF et M. SCHIRMER, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 10 (6) (2006) 873 - 887, doi: 10.5194/hess-10-873-2006
- [7] - B. KAMAGATE, A. MARIKO, L. SEGUIS, A. DAO, H. BOKAR et D. L. GONE, *IAHS*, 340 (2010) 365 - 373
- [8] - D. ZHAO G. WANG, F. LIAO, N. YANG, W. JIANG, L. GUO, C. LIU and Z. SHI., *Journal of Hydrology*, 565 (2018) 650 - 661, doi: 10.1016/j.jhydrol.2018.08.066
- [9] - A. SAKO, O. BAMBA et A. GORDIO, *Journal of Geochemical Exploration*, 170 (2016) 58 - 71, doi: 10.1016/j.gexplo.2016.08.009
- [10] - E. DIAMANTINI, S. R. LUTZ, S. MALLUCCI, B. MAJONE, R. MERZ et A. BELLIN, *Science of The Total Environment*, 612 (2018) 49 - 62, doi : 10.1016/j.scitotenv.2017.08.172
- [11] - R. R. PANT, F. ZHANG, F. REHMAN, G. WANG, M. YE, C. ZENG and H. TANG, *Science of The Total Environment*, 622 - 623, (2018) 770 - 782, doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.12.063
- [12] - A. SAKO, S. SEMDÉ et U. WENMENGA, *Journal of African Earth Sciences*, Vol. 145, (2018) 297 - 316, doi: 10.1016/j.jafrearsci.2018.05.016
- [13] - A. REZAEI, H. HASSANI, E. TZIRITIS, S. B. FARD MOUSAVI et N. JABBARI, *Groundwater for Sustainable Development*, 10 (2020) 1 - 13, doi: 10.1016/j.gsd.2020.100353
- [14] - C. BAKOUAN, B. GUEL et A.-L. HANTSON, *Afrique Science*, 13 (6) (2017) 325 - 337
- [15] - H.-K. DO, K.-H. KIM et S.-T. YUN, *Energy Procedia*, 114 (2017) 3805 - 3811 p., doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.1511
- [16] - A. L. MARQUÉS, L. RIBEIRO, N. ROQUEÑÍ, J. J. FERNÁNDEZ et J. LOREDO, *Journal of Geochemical Exploration*, 191 (2018) 43 - 53
- [17] - C. MILLOGO, " Caractérisation hydrologique et hydrogéologique du bassin versant du lac Bam au Centre Nord du Burkina Faso (Afrique de l'ouest) : perspectives d'amélioration des techniques d'implantation de forages d'eau en terrains cristallins", Thèse de doctorat unique, Université Joseph KI-ZERBO, Ouagadougou, Burkina Faso, (2019) 307 p.
- [18] - C. MILLOGO, S. NAKOLEDOUSSE, et S. SAWADOGO, *Journal des sciences*, 18 (2) (2018) 33 - 43
- [19] - B. POUYAUD, "Contribution à l'évaluation de l'évaporation de nappes d'eau libre en climat tropical sec : exemples du lac de Bam et de la mare d'Oursi (Burkina-Faso), du lac Tchad et d'Açudes du nordeste brésilien", Thèse de doctorat, Université Paris Sud-Centre d'Orsay, (1985) 244 p.
- [20] - C. CASTAING *et al.*, "Carte géologique et minière à 1/1 000 000 du Burkina Faso", (2003)
- [21] - J. P. FAILLAT et C. DROGUE, *Journal des sciences hydrologiques*, 38 (3) (1993) 215 - 229
- [22] - S. OUANDAOGO/YAMEOGO, " Ressources en eaux souterraines du centre urbain de Ouagadougou au Burkina Faso Qualité et vulnérabilité ", Thèse de doctorat, Université d'Avignon et des pays de Vaucluse, Avignon, (2008) 254 p.
- [23] - A. A. MAHAMANE et B. GUEL, *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, (1) (2015) 517 - 533
- [24] - T. LASM, O. DE LASM, M-S. Y. OGA, M. YOUAN TA, D. BAKA, F. KOUAME et T. Y. YAO, *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 5 (2) (2011) 642 - 662, doi : 10.4314/ijbcs.v5i2.72129
- [25] - A. M. KOUASSI, A. S. TIDOU et A. KAMENAN, *Agronomie Africaine*, 17 (2) (2005) 117 - 136
- [26] - S. G. EBLIN, A. P. SOMBO, GB. M. SORO, N. AKA NATACHIA, O. KAMBIRE et N. SORO, *Larhyss Journal*, (17) (2014) 193 - 214
- [27] - S. EBLIN, A. SOMBO, G. SORO, N. AKA, O. KAMBIRE et N. SORO, *Journal of Applied Biosciences*, (75) (2014) 6259 - 6271 doi: 10.4314/jab.v75i1.10
- [28] - S. OUANDAOGO/YAMEOGO, B. BLAVOUX, J. NIKIEMA et A. N. SAVADOGO, *Revue des sciences de l'eau*, 26 (3) (2013) 171 - 191

- [29] - R. SAWADOGO, I. GUIGUEMDE, F. DIENDERE, J. DIARRA et A. BARRY, *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 6 (6) (2012) 7087 - 7095
- [30] - L. TAMPO, M. GNAZOU, V. AKPATAKU, L. BAWA, G. DJANEYE-BOUNDJOU, Y. NUTO, A. OUEDA et W. GUENDA, *European Scientific Journal*, 11 (14) (2015) 204 - 225
- [31] - G. BOURRIE, "Acquisition de la composition chimique des eaux en climat tempéré. Application aux granites des Vosges et de la Margeride ", thèse de doctorat Université de Strasbourg, (1976) 170 p.
- [32] - P. L. SMEDLEY, J. KNUDSEN et D. MAIGA, *Applied Geochemistry*, 22 (5) (2017) 1074 - 1092, doi: 10.1016/j.apgeochem.2007.01.001
- [33] - P. L. SMEDLEY, *Journal of African Earth Sciences*, 22 (4) (1996) 459 - 470, doi: 10.1016/0899-5362(96)00023-1
- [34] - A. Bretzler, F. LALANNE, J. NIKIEMA, J. PODGORSKI, N. PFENNINGER, M. BERG et M. SCHIRMER, *Science of The Total Environment*, 737 (2017) 958 - 970, doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.01.147
- [35] - J. F. VERNOUX, J. LIONS, E. PETELET-GIRAUT, J. J. SEGUIN et P. STOLLSTEINER, "Contribution à la caractérisation des relations entre eau souterraine, eau de surface et écosystème terrestres associés en lien avec la DCE", Rapport final, Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Orléans - France, BRGM/RP-57044-FR, (2010) 235 p.